

影响软基础海堤外坡综合坡比因素的探讨

黄朝煊,袁文喜,王贺瑶

(浙江省水利水电勘测设计院,浙江 杭州 310002)

摘要:为优化海堤断面结构,对软基础上海堤断面外坡综合坡比进行了深入研究。依据海堤规范中的总应力法,通过适当简化模型,推导了海堤外坡综合坡比与海堤高、淤泥抗剪强度指标之间的函数关系。对典型工程海堤断面及相应淤泥层地质参数影响进行了分析,得出了海堤高度、淤泥抗剪强度指标对海堤外坡综合坡比的影响曲线,认为内摩擦角对海堤外坡综合坡比的影响比凝聚力及提高的影响更敏感。经工程实例检验,得出本文公式计算结果与实际工程相关数据基本吻合,从而证明了所提方法的有效性。

关键词:海堤整体稳定性;抗剪强度;综合坡比;软基础

中图法分类号:TV871文献标志码:A DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.10.004

1 工程背景

海堤的主要作用是挡潮防浪,防护围区安全,因此海堤整体稳定性至关重要。本文对淤泥基础海堤外侧综合坡比与整体稳定性进行研究,为海堤断面结构的优化设计提供基础。文献[1-2]中对海堤稳定计算分别提出了总应力法和有效应力法,并在多个工程项目中得到广泛应用^[3-4],毛昶熙^[5]、黄朝煊^[6]对软基础土石堤整体稳定性进行了深入研究,认为排水状况和固结时间是影响软基础稳定的重要因素。

浙江沿海地区海堤工程较多,本文统计了浙江省水利水电勘测设计院设计的采用排水插板排水固结法

进行基础处理的大断面海堤,见表1。其中温州市龙湾二期围垦工程与瓯飞一期围垦工程均为深厚淤泥基础,含水量高,抗剪强度低,涂面高程分别为-1.5,-4.0 m,外海侧综合坡比为6.5~6.7,每延米断面工程投资15万~20万,因此对海堤断面结构开展优化研究具有重要意义。

2 海堤断面结构与整体稳定性关系分析

2.1 一级平台极限堆载高度的初拟

在天然海堤的软土地基上采用快速施工法修筑海堤,所填筑的最大高度为极限高度,超过该极限高度将

表 1 浙江沿海地区海相淤泥基础已建(在建)海堤工程特性统计

工程名称	断面参数			海堤结构形式	地质状况	基础处理方法
	海堤高 H/m	断面外坡总宽 B/m	外坡综合坡比 (B/H)			
温州龙湾二期围垦	8.6	56.76	6.60	外海侧抛石,围区侧子堤+闭气土	淤泥 $w = 53\%$,淤泥质土 $w = 35\%$	排水插板法
温州瓯飞一期围垦	12.25	82.08	6.70	外海侧抛石,围区侧子堤+闭气土	淤泥 $w = 61\%$,淤泥质土 $w = 39\%$	排水插板法
	9	68.40	7.60			
舟山钓梁围垦	7.3	57.5	7.88	外海侧抛石,围区侧子堤+闭气土	淤泥 $w = 52\%$,淤泥质土 $w = 33\%$	排水插板法
临海南洋滩围垦	8.5	46.00	5.41	外海侧抛石,围区侧子堤+闭气土	淤泥 $w = 47\%$,淤泥质土 $w = 28\%$	排水插板法
临海北洋滩围垦	8.7	42.80	4.92	外海侧抛石,围区侧子堤+闭气土	淤泥 $w = 53\%$,淤泥质土 $w = 30\%$	排水插板法

发生大量沉降、坍塌。海堤整体稳定计算简图见图 1。通过极限平衡法推导,考虑堆载形状的梯形填筑的极限高度公式为

$$H_{cr} = 5.52 \frac{c_0}{\gamma} + \left[\sqrt{\left(5.52 \frac{c_0}{\gamma} \right)^2 + \left(\frac{b}{2n} \right)^2} - \frac{b}{2n} \right] \quad (1)$$

式中, H_{cr} 为极限高度; c_0 为地基不排水强度,对于预压一定时间后的,需考虑地基由固结引起的强度增长; γ 为填筑体重度; b 为梯形填筑体顶宽度; n 为梯形填筑体两侧边坡坡比;当 n 趋于 0 时,通过求极限可知 $H_{cr} = 5.52c/\gamma$ 。

该公式未考虑软土的快剪内摩擦角的影响,依据黄朝煊计算的海堤基础淤泥层承载力特征值^[7],导出海堤一级平台极限堆载高度可近似取为

$$H_{cr}' = \frac{N_0 \gamma_0 [B]/4 + N_0 \cot \varphi_0 c_0}{\gamma} \quad (2)$$

式中,淤泥层地基参数 $N_0 = \pi/(\cot \varphi_0 + \varphi_0 - \frac{\pi}{2})$; B 为子堤基础宽度, m, 国标中规定地基宽度 B 大于 6 m 时取 6 m; c_0 为淤泥层快剪凝聚力, kN; φ_0 为快剪内摩擦角, (°); γ_0 为淤泥的容重, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$; H_{cr}' 为一级平台极限堆载高度, m; γ 为抛石容重, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 其他参数同公式(1)。

2.2 海堤外侧综合坡比与整体稳定性关系

依据文献[1],海堤整体安全系数采用总应力法计算

$$F_s = \frac{\sum [(W_{1i} + W_{2i} + W_{3i}) \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i b_i \sec \alpha_i]}{(W_{1i} + W_{2i} + W_{3i}) \sin \alpha_i} +$$

$$\frac{\sum T_{\text{织物}}}{(W_{1i} + W_{2i} + W_{3i}) \sin \alpha_i} \quad (3)$$

式中, F_s 为总应力法下的安全系数; i 为第 i 个土条底面中点的径向与竖向方向夹角, (°); W_{1i} 、 W_{2i} 、 W_{3i} 为第 i 个土条浸润线以上的土体的天然重度、浸润线与外坡水位之间的土体的浮重度以及外坡水位以下土体的浮重度; b_i 为第 i 个土条的宽度; φ_i 、 c_i 为第 i 个土条底部土体的总抗剪强度指标; $T_{\text{织物}}$ 表示海堤排水插板碎石垫层下的土工材料的抗拉强度。

随着超静孔隙水压力的消散,淤泥土固结度不断提高,土颗粒之间的有效应力增加,抗剪强度也随之不断变化(提高),计算稍显复杂。故而本文采用总应力法,对淤泥处理区抗剪强度取 0.85 倍的固结抗剪强度^[2]。设堤顶宽 6 m,外海侧堤顶至外海镇压层的斜坡段坡比为 1:3,镇压层由 0.5H 降至 (0.5H - 0.5) 高程,外海侧堤脚坡比 1:4,见图 2。

依据海堤设计文献[1],滑动安全系数 F_s 为滑动圆弧区抗滑力矩总和与滑动力矩总和比值,见图 2。抗滑力矩有:圆弧 BG 区的淤泥凝聚力,圆弧 GH 区的淤泥天然凝聚力,圆弧 AB 区抛石的法向压力产生的抗滑力,圆弧 BG 区淤泥法向压力产生的抗滑力,圆弧 GH 区未处理的淤泥法向压力产生的抗滑力,圆弧 EH 区的切向抗滑力。滑动力矩有:圆弧 AB 区抛石的切向下滑力,圆弧 BE 区淤泥的切向下抗滑力。

通过分区计算,得到外海侧滑动安全系数与断面参数、滑弧位置等(海堤高 H 、滑动圆弧中心角 2θ 、滑动圆弧滑出点距外坡坡脚距离 s 、滑动圆弧半径 R 等)之间的关系式为

$$F_s = \frac{[2R\theta c_0 \cot \varphi_0 + 2\gamma_0 R^2 k_1] + [0.5H^2 \cos \theta + k_2 HR + R(k_3 R + k_4 H) + R(k_5 R + k_6 H)] \gamma_s \tan \varphi_0}{[0.5H^2 \sin \theta + k_7 HR + R(k_8 R + k_9 H) - R(k_{10} R + k_{11} H)] \gamma_s} \quad (4)$$

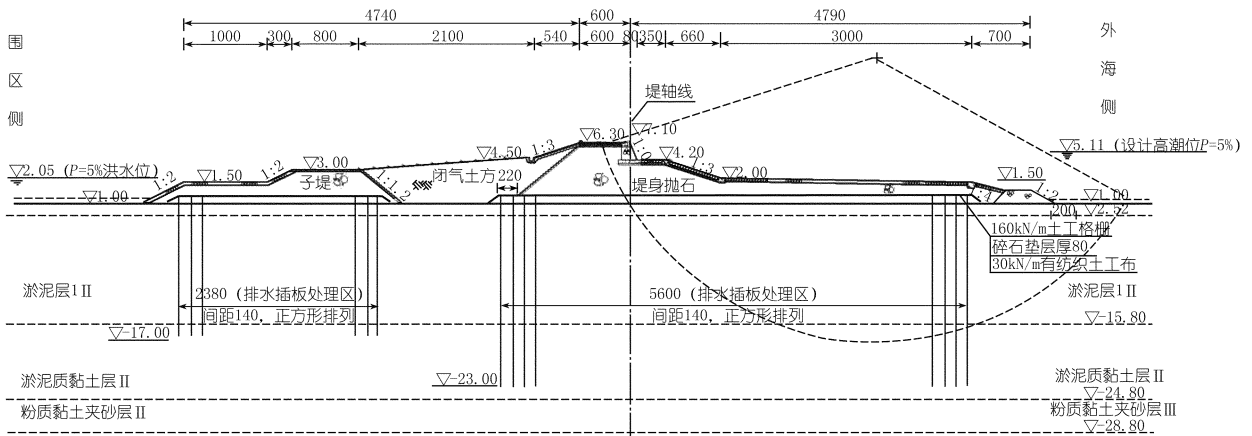


图 1 海堤整体稳定计算简图(尺寸单位:cm)

式中,积分参数 $k_1 = \int_0^\theta (\cos\beta - \cos\theta) \cos^2\beta d\beta, k_2 = 0.15\theta \cos^2(0.85\theta), k_3 = k \int_{-0.7\theta}^0 \sin\beta \cos^2\beta d\beta, k_4 = 0.3 \int_{-0.7\theta}^0 \cos^2\beta d\beta, k_5 = k \int_0^{\theta - \frac{s}{12H}\theta} \sin\beta \cos^2\beta d\beta, k_6 = 0.3 \int_0^{\theta - \frac{s}{12H}\theta} \cos^2\beta d\beta, k_7 = 0.075\theta \sin(1.7\theta), k_8 = 0.5 \int_{-0.7\theta}^0 \sin\beta \sin(2\beta) d\beta, k_9 = 0.15 \int_{-0.7\theta}^0 \sin(2\beta) d\beta, k_{10} = 0.5k \int_0^{\theta - \frac{s}{12H}\theta} \sin\beta \sin 2\beta d\beta, k_{11} = 0.15 \int_0^{\theta - \frac{s}{12H}\theta} \sin 2\beta d\beta$,其中 β 为滑动圆弧面积分变量角,其他参数同上文。

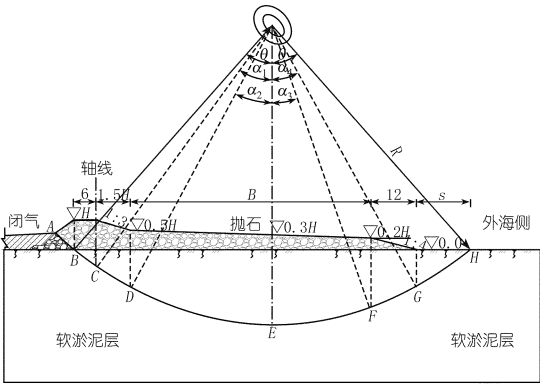


图 2 海堤整体稳定计算模型示意(尺寸单位:m)

为了分析最不利滑动圆弧位置,需对公式(4)分别对滑动圆弧中心角 2θ 、滑动圆弧滑出点距外坡坡脚距离 s 两变量参数求偏导数,满足 $\partial F_s / \partial \theta = 0, \partial F_s / \partial s = 0$,并联立求解方程得出参数滑动圆弧中心角 2θ 、滑动圆弧滑出点距外坡坡脚距离 s 与海堤高 H 、淤泥抗剪强度指标之间的函数关系,进而通过推导计算得出海堤断面外坡综合坡比 m 的建议公式。但由于滑动安全系数计算公式为分数形式,其分子、分母中均含有 θ, s 的多项非线性项,其求导计算极其复杂,通过手算不可能得出满意的结果。通过大量工程实际经验,笔者认为外坡最不利滑弧位置的规律具有一定规律性,因此,本文取 $\theta = 40^\circ, 60^\circ$,相应的参数 $s = H, 4H$,分别计算滑动安全系数,依据海堤规范中 10.2.3 条滑动安全系数控制标准^[1],取 ① $\theta = 40^\circ, s = H$; ② $\theta = 40^\circ, s = 4H$; ③ $\theta = 60^\circ, s = H$; ④ $\theta = 60^\circ, s = 4H$ 这 4 种组合下安全系数的最小值作为最不利安全系数分析,从而得出海堤外侧综合坡比建议值计算公式。

通过简化计算,即知外海侧综合坡比为

$$m = \frac{2\sin\theta R - s - 0.5H}{H} = 2\sin\theta \frac{R}{H} - \frac{s}{H} - 0.5 \tag{5}$$

其中,滑动圆弧半径 R 通过以下二次方程求解

$$(0.007F_s \cot\varphi_0 - 0.194 \frac{\gamma_0}{\gamma_s}) R^2 - (0.003HF_s \cot\varphi_0 + 0.359H + 1.4c_0 \cot\varphi_0 / \gamma_s) R + (0.32H^2 F_s \cot\varphi_0 - 0.383H^2) = 0 \tag{6}$$

求解得圆弧滑动面半径为

$$R = \frac{-P + \sqrt{P^2 - 4Q}}{2} \tag{7}$$

其中参数,

$$P = - \frac{3HF_s \cot\varphi_0 + 359H + 1400c_0 \cot\varphi_0 / \gamma_s}{7F_s \cot\varphi_0 - 194 \frac{\gamma_0}{\gamma_s}},$$
$$Q = - \frac{320H^2 F_s \cot\varphi_0 - 383H^2}{7F_s \cot\varphi_0 - 194 \frac{\gamma_0}{\gamma_s}}$$

通过对图 2 中计算模型进行分析,由滑动面参数推导得外海侧综合坡比 m 的建议值为

$$m = 0.65 \frac{\sqrt{P^2 - 4Q} - P}{H} - 1.5 \tag{8}$$

为了便于实际应用,采用数值简化,如取淤泥容重 $\gamma = 16.7\text{kN/m}^3$,抛石容重 $\gamma = 19\text{kN/m}^3$,对以上数值简化分析得

$$\begin{cases} P = - \frac{(4.26\cot\varphi_0 + 359)}{(9.94\cot\varphi_0 - 171)} H - \frac{73.7\cot\varphi_0}{(9.94\cot\varphi_0 - 171)} c_0 \\ Q = - \frac{(454.4\cot\varphi_0 - 383) H^2}{(9.94\cot\varphi_0 - 171)} \end{cases} \tag{9}$$

为了分析外侧综合坡比与海堤高、淤泥层内摩擦角、淤泥凝聚力之间的关系,本文取某一典型工程的地质参数进行分析,相关结果见图 3~5。

由图 3~5 可知,淤泥抗剪强度指标越小、海堤越高,则海堤最危险滑动圆弧就越大,其外海侧综合坡比 m 就越大;内摩擦角比凝聚力对海堤整体稳定性的影响更敏感。通过对一些已建工程的数值验证分析可知(表 2),公式(8)对工程设计具有一定指导意义。

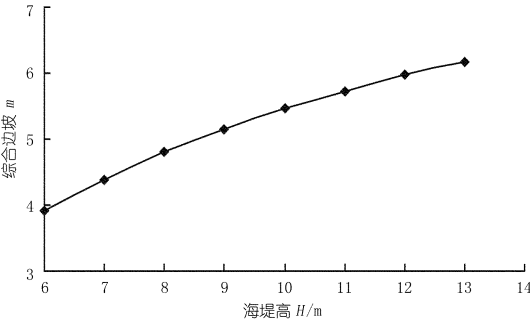


图 3 海堤高度对外侧综合坡比的影响关系

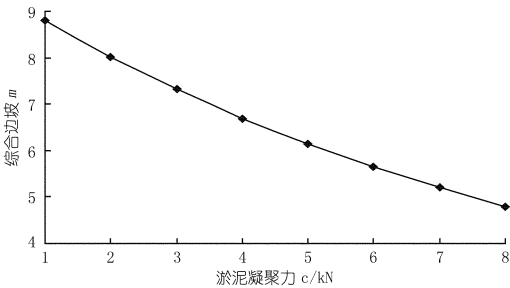


图 4 淤泥层凝聚力对外侧综合坡比的影响关系

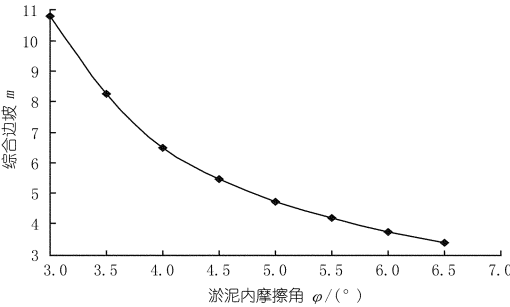


图 5 淤泥层内摩擦角对外侧综合坡比的影响关系

表 2 海堤宽度经验计算公式与工程实际设计的比较

工程名称	断面参数		淤泥参数		设计外坡综合坡比	公式(9)值
	高 H/m	淤泥 $w/\%$	c/kN	$\varphi/(^{\circ})$		
温州龙湾二期围垦	8.6	53	5.8	3.4	6.6	6.28
温州市瓯飞一期围垦	12.3	61	5.2	4.2	6.7	6.23
	9	61	5.6	3.8	6.5	5.92

3 结论

(1) 对作者所在单位设计的深厚淤泥基础上海堤典型断面进行了统计分析,结果表明深厚淤泥基础含水量较大(45%~65%),淤泥基础抗剪强度指标较小,且海堤外海侧断面受风浪及潮水影响,为保证其断面稳定(排水插板处理基础),外海侧断面综合坡比一般在5.5~7.5范围。淤泥基础凝聚力越小,内摩擦角越小,海堤高度越大,则外海侧综合坡比就越大。对于

海堤高度较高时,建议可采用分期建设的思路,如一期促淤工程,二期在一期断面的基础上再加高建设。

(2) 对深厚淤泥基础上的海堤断面一级平台极限堆载高度进行了分析,认为海堤规范提出的计算公式未考虑淤泥内摩擦角对极限承载力的影响,可考虑用地基规范中的承载力公式推求一级平台极限堆载高度。

(3) 依据海堤规范中的总应力法,对典型海堤断面外坡整体稳定进行了研究。通过适当简化模型,减少参数,推导了海堤外坡综合坡比 m 与海堤高 H 、淤泥抗剪强度指标之间的函数关系,并对典型工程海堤断面及相应淤泥层地质参数进行了影响分析,得出了海堤高度 H 、淤泥抗剪强度指标对海堤外坡综合坡比的影响曲线,认为内摩擦角对海堤外坡综合坡比的影响比凝聚力及堤高的影响更敏感。

由于淤泥层较厚,其不同深度层的抗剪强度也不同,本文建议对圆弧滑动面深度内的淤泥层取厚度加权平均后的抗剪强度指标,上述处理难免产生一定误差。基于以上不足,笔者将对该问题进行进一步深入研究。

参考文献:

[1] SL435-2008 海堤工程设计规范[S].
[2] 浙江省水利厅.浙江省海塘工程技术规定(上,下册)[S].杭州:浙江省水利厅,1999.
[3] 浙江省水利水电勘测设计院.浙江省温州市龙湾二期围涂工程初步设计报告[R].杭州:浙江省水利水电勘测设计院,2010.
[4] 浙江省水利水电勘测设计院.浙江省温州市瓯飞一期围涂工程可行性研究报告[R].杭州:浙江省水利水电勘测设计院,2011.
[5] 毛昶熙,段祥宝,毛佩郁,等.海堤结构型式及抗滑稳定性计算分析[J].水利学报,1999,(11):30-37.
[6] 黄朝煊,方咏来,袁文喜.深淤泥基础海堤断面结构与整体稳定关系初探[J].长江科学院院报,2013,(2):62-66.
[7] 黄朝煊,袁文喜,方咏来. $K_0 \neq 1$ 时基础软弱下卧层临界埋深的讨论[J].长江科学院院报,2013,(1):56-60.

(编辑:郑毅)

Research on influential factors on integrated outer – slope ratio of sea dike on soft foundation

HUANG Chaoxuan, YUAN Wenxi, WANG Heyao

(Zhejiang Provincial Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Hangzhou 310002, China)

Abstract: The research on the integrated outer – slope ratio of sea dike on soft foundation is carried out, so as to optimize the sectional structure of sea dikes. According to the general stress algorithm recommended by the sea dike standard, the functional relation between integrated outer – slope ratio and dike height or silt shear strength is deduced by simplifying the model. Based on analysis of several typical sea dike projects and the geological parameters, the relation curve of the outer – slope ratio and the dike height or silt shear strength is obtained. The results show that compared with the cohesion force and dike height, the internal friction angle is more sensitive to the slope ratio. Also through the check calculation of practical projects, the calculated results are in accordance with the measured data, which validates the effectiveness of the presented method.

Key words: stability of sea dike; shear strength; integrated outer – slope ratio; soft foundation